

Exemplo de trabalho de Análise de Estruturas com uso do Ftool

Simulação computacional do Método dos Deslocamentos

Estude o tutorial sobre o Método dos Deslocamentos disponível em “<http://www.tecgraf.puc-rio.br/etools/metdes>” (versão *on-line*) ou em “http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/metdes1_0_0.exe” (versão *off-line*). Obtenha a programa Ftool em “<http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool>”. Siga os passos descritos nos itens abaixo e escreva um relatório. Este relatório deve conter as figuras que forem necessárias para descrever a simulação e seus valores numéricos.

Item (a) – Estrutura original a ser resolvida

Defina arbitrariamente, usando o programa Ftool, um quadro plano com pelo menos quatro deslocabilidades. Defina também as propriedades elásticas e geométricas das barras e as cargas que atuam no quadro. Adote todas as unidades em kN e m. Crie uma figura com a estrutura, suas dimensões e todas as propriedades e cargas utilizadas. Essa figura deve mostrar a configuração deformada da estrutura, com as componentes de deslocamentos e rotações (com valores e unidades) dos nós do modelo estrutural indicadas. Essas componentes de deslocamentos e rotações dos nós são as incógnitas do Método dos Deslocamentos, são chamadas de *deslocabilidades*, e devem ser identificadas pelo nome D_j , sendo j o número da deslocabilidade. Sugestão: imprima a imagem da tela do programa e desenhe as deslocabilidades com seus nomes, valores e unidades à mão. Anote os valores das deslocabilidades (com sinal) para usar no item (f).

Item (b) – Sistema Hipergeométrico

Obtenha uma estrutura completamente indeslocável (todos os nós com deslocamentos e rotações impedidos) a partir da inserção de vínculos externos (apoios fictícios) na estrutura do item (a). Essa estrutura será o Sistema Hipergeométrico (SH) para a resolução da estrutura original pelo Método dos Deslocamentos. Mostre o SH em uma figura com os apoios fictícios numerados de acordo com a numeração das deslocabilidades.

Item (c) – Caso básico (0)

Para o Sistema Hipergeométrico do item (b), mantenha o carregamento do item (a). Isto corresponde ao caso (0) do Método dos Deslocamentos. Mostre a configuração deformada da estrutura juntamente com o carregamento aplicado, indicando as reações de apoio (com valores e unidades) que correspondem aos termos de carga β_{i0} . Sugestão: imprima a imagem da tela do programa e desenhe os nomes, valores (com sinal) e unidades dos termos de carga à mão.

Item (d) – Casos básicos que isolam as deslocabilidades

Retire as cargas utilizadas no item (c) e imponha ao Sistema Hipergeométrico, alternadamente, deslocamentos ou rotações prescritos com valores unitários nos nós onde os vínculos foram inseridos no item (b). Utilize a opção *Prescribed Displacements* do menu *Support Conditions* para impor um deslocamento prescrito. Isso deve gerar um caso de sollicitação para cada deslocabilidade imposta independentemente, sendo que cada um corresponde a um dos casos (j) do Método dos Deslocamentos, onde j é o número de uma deslocabilidade. Mostre a configuração deformada da estrutura para cada uma das deslocabilidades unitárias impostas, indicando as reações de apoio (com valores, sinais e unidades) que correspondem aos *coeficientes de rigidez* K_{ij} . Sugestão: imprima a imagem da tela do programa e desenhe os nomes, valores, sinais e unidades dos coeficientes de rigidez à mão.

Item (e) – Sistema de equações de equilíbrio

Com base nos resultados dos itens (c) e (d), monte o sistema de equações de equilíbrio que resulta da solução do quadro original pelo Método dos Deslocamentos. Os valores numéricos dos coeficientes deste sistema de equações são obtidos dos termos de carga e dos coeficientes de rigidez.

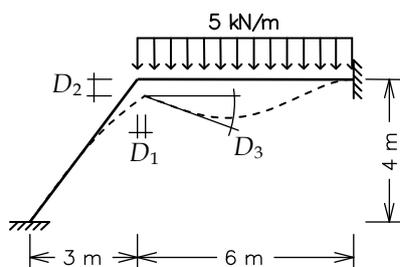
Item (f) – Verificação da solução do sistema de equações de equilíbrio

Com base nos resultados da estrutura original do item (a), verifique se os valores das deslocabilidades correspondem realmente à solução do sistema de equações obtido no item (e).

Item (g) – Obtenção de esforços internos

Indique os passos seguintes à solução do sistema de equações de equilíbrio que seriam necessários para complementar o cálculo dos esforços internos da estrutura pelo Método dos Deslocamentos.

Exemplo de solução de um pórtico com 3 deslocabilidades pelo Método dos Deslocamentos



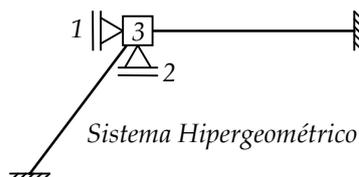
Todas as barras da estrutura do exemplo têm as mesmas propriedades elásticas e de seção transversal. O material adotado tem módulo de elasticidade $E = 1.2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$. A seção transversal das barras tem área $A = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ e momento de inércia $I = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^4$.

A figura acima também indica a configuração deformada da estrutura (com uma amplificação de 450 vezes) e as deslocabilidades D_1 , D_2 e D_3 , correspondendo, respectivamente, aos deslocamentos horizontal e vertical e rotação do nó interno. Deslocabilidades são as componentes de deslocamentos e rotações nodais que estão livres, isto é, que devem ser conhecidas para determinar a configuração deformada de uma estrutura. As deslocabilidades são os parâmetros que definem (completamente) a configuração deformada de uma estrutura. As deslocabilidades são as incógnitas do Método dos Deslocamentos.

A metodologia utilizada pelo Método dos Deslocamentos para analisar uma estrutura consiste em: "somar uma série de casos básicos que satisfazem as condições de compatibilidade, mas que não satisfazem as condições de equilíbrio da estrutura original, para na superposição restabelecer as condições de equilíbrio."

Cada caso básico satisfaz isoladamente as condições de compatibilidade (continuidade interna e compatibilidade com respeito aos vínculos externos da estrutura). Entretanto, os casos básicos não satisfazem as condições de equilíbrio da estrutura original pois são necessários forças e momentos adicionais para manter o equilíbrio. As condições de equilíbrio da estrutura ficam restabelecidas quando se superpõem todas as soluções básicas.

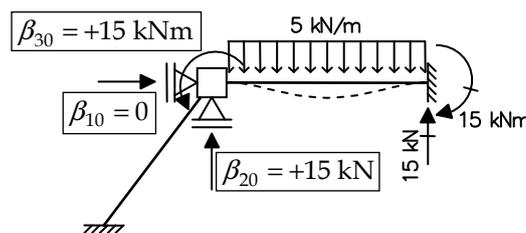
A estrutura utilizada na superposição de casos básicos é uma estrutura cinematicamente determinada obtida a partir da estrutura original pela adição de vínculos. Essa estrutura auxiliar é denominada *Sistema Hipergeométrico* (SH). Apoios fictícios são adicionados à estrutura para impedir (prender) as deslocabilidades:



O equilíbrio da estrutura é imposto na forma de equilíbrio dos nós isolados. Portanto, a solução desse problema pelo Método dos Deslocamentos recai em encontrar os valores que D_1 , D_2 e D_3 devem ter para que o nó interno fique em equilíbrio.

No exemplo em estudo, existem quatro casos básicos – casos (0), (1), (2) e (3) – conforme descrito a seguir.

Caso (0) – solicitação externa (carregamento) isolada no SH

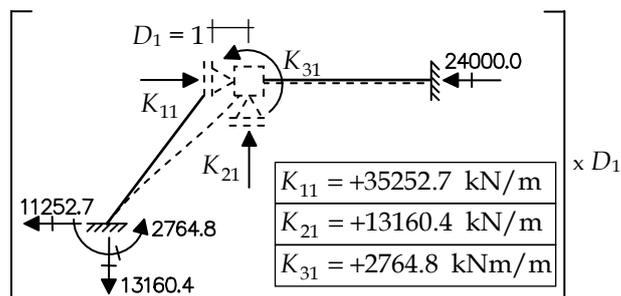


O caso (0) isola o efeito da solicitação externa, isto é, do carregamento aplicado. Dessa forma, a carga externa é aplicada no SH com $D_1 = 0$, $D_2 = 0$ e $D_3 = 0$. Nesse caso, as forças e os momentos que aparecem nos apoios fictícios do SH são chamados de *termos de carga*:

β_{i0} → reação no apoio fictício associado à deslocabilidade de D_i para equilibrar o SH quando atua a solicitação externa isoladamente, isto é, com deslocabilidades com valores nulos.

Neste exemplo, são três os termos de carga, sendo que β_{10} é a reação horizontal, β_{20} é a reação vertical e β_{30} é a reação momento nos três apoios fictícios do nó interno. Essas reações correspondem à situação de engastamento perfeito do SH, e os seus valores são obtidos para o carregamento aplicado na barra horizontal.

Caso (1) – Deslocabilidade D_1 isolada no SH



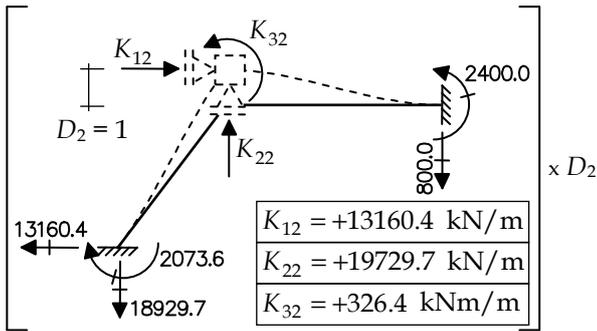
O caso (1) isola o efeito da deslocabilidade D_1 , mantendo nulos os valores das deslocabilidades D_2 e D_3 . Conforme indicado na figura acima, a deslocabilidade D_1 é colocada em evidência. Considera-se um valor unitário para D_1 , sendo o efeito de $D_1 = 1$ multiplicado pelo valor final que D_1 deverá ter.

As forças e momentos que aparecem nos apoios fictícios do SH para equilibrá-lo quando é imposta uma configuração onde $D_1 = 1$ são chamados de *coeficientes de rigidez globais*:

K_{ij} → *coeficiente de rigidez global*: força ou momento que deve atuar na direção de D_i para manter a estrutura (na verdade, o SH) em equilíbrio quando é imposta uma configuração deformada onde $D_j = 1$ e as demais deslocabilidades são nulas.

No caso (1), os coeficientes de rigidez globais são a força horizontal K_{11} , a força vertical K_{21} e o momento K_{31} . Por definição, as unidades dos coeficientes de rigidez correspondem às unidades de força ou momento divididas pela unidade da deslocabilidade em questão. Neste exemplo, no caso (1) a unidade de D_1 é a de deslocamento em metros.

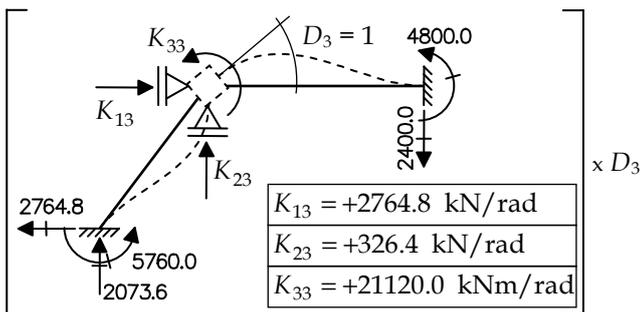
Caso (2) – Deslocabilidade D_2 isolada no SH



De maneira análoga, no caso (2) a deslocabilidade D_2 é colocada em evidência, considerando o efeito devido a um valor unitário de D_2 multiplicado pelo seu valor final. Esse caso isola o efeito da deslocabilidade D_2 , mantendo nulos os valores das deslocabilidades D_1 e D_3 .

A força horizontal K_{12} , a força vertical K_{22} e o momento K_{32} , que aparecem nos apoios fictícios do SH para mantê-lo em equilíbrio quando é imposta uma configuração deformada onde $D_2 = 1$, são os coeficientes de rigidez globais que aparecem no caso (2). As unidades desses coeficientes, por definição, são unidades de força ou momento divididas pela unidade da deslocabilidade D_2 (metro).

Caso (3) – Deslocabilidade D_3 isolada no SH



Esse caso isola o efeito da deslocabilidade D_3 , mantendo nulos os valores das deslocabilidades D_1 e D_2 . No caso (3) a deslocabilidade D_3 é colocada em evidência, considerando o efeito devido a um valor unitário de D_3 multiplicado pelo seu valor final. A figura acima também mostra os coeficientes de rigidez globais desse caso. Observe que as unidades desses coeficientes são unidades de força ou momento divididas por radiano, pois a deslocabilidade D_3 é uma rotação.

Restabelecimento das condições de equilíbrio

A partir dos resultados obtidos nos casos mostrados acima, pode-se utilizar a superposição dos casos para restabelecer as condições de equilíbrio do nó interior. As resultantes de forças e momentos externos neste nó devem ser nulas, tal como feito a seguir.

- Somatório das forças externas horizontais que atuam no nó interior:

$$\beta_{10} + K_{11}D_1 + K_{12}D_2 + K_{13}D_3 = 0$$

- Somatório das forças externas verticais que atuam no nó interior:

$$\beta_{20} + K_{21}D_1 + K_{22}D_2 + K_{23}D_3 = 0$$

- Somatório dos momentos externos que atuam no nó interior:

$$\beta_{30} + K_{31}D_1 + K_{32}D_2 + K_{33}D_3 = 0$$

A solução do sistema formado pelas três equações acima, com os valores mostrados anteriormente para os termos de carga β_{i0} e para os coeficientes de rigidez globais K_{ij} , resulta nos seguintes valores para as deslocabilidades:

$$D_1 = +0.4504 \times 10^{-3} \text{ m};$$

$$D_2 = -1.0480 \times 10^{-3} \text{ m};$$

$$D_3 = -0.7530 \times 10^{-3} \text{ rad}.$$

Esses valores fazem com que as resultantes de forças e momentos externos que atuam no nó interno da estrutura sejam nulas. Dessa forma, atingiu-se a solução correta da estrutura, pois além de satisfazer as condições de compatibilidade – que sempre foram satisfeitas nos casos (0), (1), (2) e (3) – ela também satisfaz as condições de equilíbrio, haja vista que não existem forças e momentos externos aplicados ao nó. O equilíbrio dos outros dois nós sempre foi satisfeito pelas reações de apoio, cujos valores finais podem ser obtidos pela superposição dos valores das reações obtidos em cada caso.

Os sinais das deslocabilidades são determinados pelos sentidos em que foram impostos os deslocamentos unitários e a rotação unitária nos casos básicos. Assim, o sinal positivo de D_1 indica que esse deslocamento tem o mesmo sentido (da esquerda para a direita) do deslocamento horizontal imposto no caso (1). O sinal negativo de D_2 indica que esse deslocamento vertical é para baixo pois é contrário ao deslocamento unitário imposto no caso (2). E o sinal negativo de D_3 mostra que essa rotação é no sentido horário pois é contrária à rotação unitária imposta no caso (3).

Determinação dos esforços internos finais

Uma vez determinados os valores das deslocabilidades, os diagramas finais de esforços da estrutura do exemplo em estudo também podem ser obtidos pela superposição dos diagramas de cada um dos casos básicos. Por exemplo, os momentos fletores finais (M) podem ser obtidos pela superposição dos diagramas de momentos fletores (M_i) dos casos básicos:

$$M = M_0 + M_1D_1 + M_2D_2 + M_3D_3,$$

sendo que o diagrama M_0 corresponde ao caso (0) e os diagramas M_1 , M_2 e M_3 são devidos a valores unitários das deslocabilidades nos casos (1), (2) e (3).

Esse resultado pode ser generalizado para os esforços normais finais (N) e esforços cortantes finais (Q):

$$N = N_0 + N_1D_1 + N_2D_2 + N_3D_3;$$

$$Q = Q_0 + Q_1D_1 + Q_2D_2 + Q_3D_3.$$